

文章编号 1004-924X(2011)11-2693-10

## 用于精密定位平台的直线超声电机的异步并联

王金鹏\*, 金家楣, 赵淳生

(南京航空航天大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:**提出了直线超声电机异步并联的概念以提高精密定位平台驱动单元的位移分辨率、输出力及速度。基本原理是若干定子(或振子)在一个振动周期内交替驱动转子(或转子),使实际的驱动频率成倍提高,可以获得更好的输出性能。分析显示,提高定子与转子之间的接触频率可以提高输出力和速度,改善瞬态响应特性,并可避免同步并联方式下定子的相互干扰问题。两种电机异步并联的实验结果表明,两个定子异步并联时的最大负载力比两个定子同步并联提高了 30% 以上,比两个定子单独驱动时的推力之和提高 25% 以上。最小分辨率测试实验表明,异步并联时最小位移分辨率达到 32.6 nm,是单个电机的 62.8%,是同步并联的 38.5%。单驱动头电机的实验还表明,异步并联时空载直线速度比单个定子和两个定子同步并联时都提高了 10% 以上,最大效率比两个定子同步并联驱动时提高约 50%,瞬态响应时间比同步并联更短,约为单个定子驱动时的 50%。

**关键词:**直线超声电机;异步并联;定位平台;机械特性;瞬态特性

**中图分类号:** TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2693

## Asynchronous bundling of linear ultrasonic motor for precision positioning stage

WANG Jin-peng\*, JIN Jia-mei, ZHAO Chun-sheng

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding author, E-mail: mejpx@yahoo.cn

**Abstract:** A concept of Asynchronous Bundle of Linear Ultrasonic Motor (ABLUSM) was proposed to improve the resolution, thrust and the speed of driving unit for a precision positioning stage. It points out that a numbers of stators (vibrators) alternately drive a mover (rotor) in a vibration cycle, the actual driving frequency is increased doubly, and better output performance can be expected. An analysis shows that increasing the contact frequency between stator and mover is able to improve the output force, speed and transient response characteristics of a Linear Ultrasonic Motor (LUSM). Meanwhile, it can avoid the mutual interference of different stators in Synchronous Bundling of LUSM (SBLUSM). Experimental results of two types of motors show that the maximum load force of the ABLUSM is 30% upon that of the SBLUSM or 25% over that of the sum of two motors when they

收稿日期: 2011-05-11; 修订日期: 2011-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金资助项目 (No. U0934004); 国家自然科学基金资助项目 (No. 10874090); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB707602)

drive the slider respectively. Results of minimum resolution test show that the minimum displacement resolution of the ABLUSM is 32.6 nm, which is 62.8% that of a single LUSM or 38.5% that of the SBLUSM. The mechanical characteristic experiments of the LUSM with one driving tip also prove that the no-load speed of ABLUSM has increased by 10% as compared with that both of the single stator and the SBLUSM. Moreover, the maximum efficiency has by 50% over that of the SBLUSM. Transient response time is shorter than SBLUSM, which is about 50% of a single stator.

**Key words:** linear ultrasonic motor; asynchronous bundle; positioning stage; mechanical property; transient characteristics

## 1 引言

直线超声电机的发展起始于 20 世纪 80 年代,日本学者 Sashida 在行波型旋转超声电机研究的基础上,提出了直梁式、环梁式两种基于行波的直线超声电机<sup>[1]</sup>。

与直线电磁电机比较,直线超声电机具有响应快、断电自锁、结构简单等特点。超声电机驱动的精确定位平台在精密加工、精密检测及生物医学等高科技领域得到了广泛的认同,但目前精确定位平台的驱动单元还存在着许多问题,如位移分辨率低,最小步距一般是几个微米,难以满足越来越精密的定位系统的需求;输出功率小,出力小,在精密定位系统中,存在快速响应和高定位精度之间的矛盾;这些因素制约了直线超声电机在精密定位领域的应用。

为了提高直线超声电机的输出功率和位移分辨率,很多学者对直线超声电机本体设计进行了探索。日本学者 Kurosawa 在 1998 年提出了一种 V 型大推力直线超声电机<sup>[2]</sup>,时运来、李玉宝等在其基础上研制了 V 型直线超声电机样机<sup>[3]</sup>,其最大推力达到 20 N,速度最高达到 0.9 m/s。Kazumasa Asumi 2009 年把 Kurosawa 提出 V 型电机的压电单元改成多层叠堆压电陶瓷,最大速度达 1.5 m/s,推力为 25 N,且实现了惯性驱动和 DC 驱动模式,DC 模式下取得 1.5 nm 的分辨率<sup>[4]</sup>。此后,李玉宝又提出了双驱动头大推力直线型超声电机<sup>[5]</sup>,电机无负载速度最高可达 950 mm/s,最大输出力可达 16 N。同样是两个驱动头的还有双轮式直线超声电机<sup>[6]</sup>,其空载速度为 180 mm/s,最大输出力为 16.2 N,最小步距为 2  $\mu\text{m}$ ,效率达到 38%。这两种超声电机的特点是两个驱动头交替作用于动子,在驱动信号的一个

周期时间内,完成两次驱动过程。以上这些大功率直线电机虽然最大输出力、最大速度已经有了较大提高,但单个直线超声电机的输出功率仍很有限,位移分辨率难以突破。以后, Yangming 研究了采用两个频率驱动矩形板的直线超声电机<sup>[7]</sup>,其给出的结果比单一频率驱动的电机输出力提高了 70%。金家楣在 K. Suzuki 提出的利用矩形薄板垂直方向上两个弯曲振动模态  $B_{20}$  和  $B_{04}$  的三齿直线超声电机的基础上提出了利用正方形板结构的  $B_{30}$  和  $B_{03}$  模态的四齿直线超声电机<sup>[8]</sup>,其四个齿(驱动头)交替驱动动子,最大输出力和效率分别为 5.3 N 和 35%。这种电机启动时间为 2.8 ms,关断时间为 2.1 ms,位移分辨率较高,步进时最小步距为 1  $\mu\text{m}$ 。

为了进一步提高输出功率,不少学者研究了直线超声电机的同步并联技术,即将多个直线超声电机定子并联,共用一个动子,习惯上称作直线超声电机并联。Kurosawa 将其提出的 V 型大推力直线超声电机并联<sup>[9]</sup>,用在大型望远镜的精密驱动系统中。Nanomotion 公司的 HR<sub>2</sub>、HR<sub>4</sub> 超声电机实际上也是属于超声电机的并联。国内在直线超声电机同步并联方面也进行了一些研究<sup>[10]</sup>,但由于加工精度、装配精度、压电陶瓷之间的性能差异,同步并联的直线超声电机虽然输出力会大幅上升,但功率会部分相互抵消,效率会有所降低。针对这些问题,德国学者 M. Mracek, T. Hemsel 等人对 4 个定子并联时各种激励方式的特点进行了较详尽的描述,其分别为:分别激励、单一频率激励、扫频激励和偏离共振区激励<sup>[11-13]</sup>。4 种激励方式各有优缺点,但未能真正解决多定子同时工作时,有些定子驱动动子运动,其余定子可能会阻止动子运动的问题。而且要做到两个定子频率完全相同几乎不可能,即无法做到让每一个驱动头按照同样的椭圆轨迹同步

驱动动子。

基于以上分析,本文提出了直线超声电机异步并联的方案,此方案中,多个定子交替作用于动子,在提高输出功率的同时,可提高效率,改善瞬态响应特性。

### 2 直线超声电机的异步并联概念

由于无法使并联的直线超声电机的各个定子驱动头按同样的椭圆轨迹同步驱动动子,因此提出让这些驱动头按一定时间间隔依次驱动动子运动,如同把这些驱动头布置在一个以信号周期  $T$  为转动周期的转轮上,如图 1 所示。

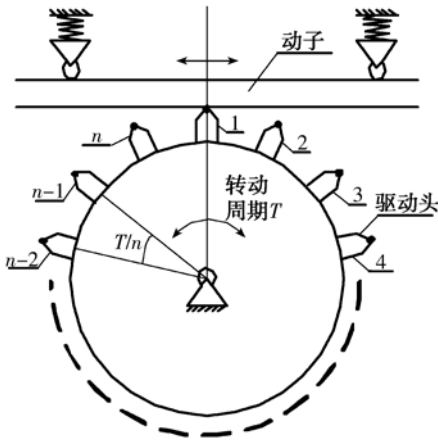


图 1  $n$  个直线超声电机定子异步并联示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ABLUSM with  $n$  stators

将  $n$  个直线超声电机定子依次间隔  $T/n$  作用于同一个动子,而不是同时作用于动子定义为“异步并联”。此方案中的直线超声电机的驱动信号为  $n$  组相位差分别为  $90^\circ$  的正弦信号,假设信号周期为  $T$ ,也就是每个电机的驱动头端部一个完整椭圆运动的周期为  $T$ ,则相邻两组驱动信号之间的相位差为  $T/n$ ,或者说其中一组信号相对另一组信号有约  $T/n$  的延时,这也是异步并联方案与以往文献的主要区别。理论上, $n$  可以无限大,但须保证在同一时刻不能有两个驱动头同时接触动子,否则,能量内部耗散会增加。在电机已经确定的情况下,定子驱动头椭圆运动周期除以单个定子与动子之间的接触时间即为最大并联个数。

### 3 直线超声电机工作原理

图 2 所示是一个定子与动子之间间歇接触的直线超声电机示意图,其驱动头顶端质点的运动为  $x$  方向和  $y$  方向振动的合成,其轨迹为一个椭圆。在定子一个振动周期内,驱动头顶端在一个较小的时段内与动子接触,通过摩擦力推动动子沿  $x$  方向运动,而在定、动子脱离期间,动子以接触期间获得的能量进行衰减运动,在此期间定子不做功,直到再次接触。

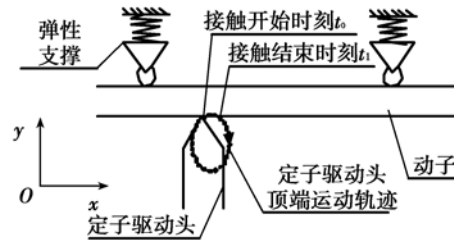


图 2 间歇接触直线型超声电机工作原理

Fig. 2 Working principle of LUSM

直线超声电机稳定运行阶段,接触期间动子的运动可以用微分方程描述,

$$\begin{cases} m \frac{d\dot{x}}{dt} + c\dot{x} = F_a(t) - F_l \\ \dot{x}(t_0) = v_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\dot{x}$  为动子运动速度, $m$  为动子的质量, $c$  为动子运动阻尼, $F_a(t)$  为定子对动子的驱动力; $F_l$  为负载力。

在定、动子开始接触及脱离前的一小段时间内,二者之间可能会产生滑动,但为了简化推导过程,假定接触面上没有相对滑动,则定、动子接触期间动子的速度为:

$$\dot{x}_c(t) = v_0 e^{-\frac{c}{m}(t-t_0)} + e^{-\frac{c}{m}(t-t_0)} \int_{t_0}^t \frac{F_a(t) - F_l}{m} e^{\frac{c}{m}(t-t_0)} dt, \quad (2)$$

其中,  $t_0$  为开始接触时刻。

设定、动子在时刻  $t_1$  脱离,则在接触期间  $t_0 < t < t_1$ , 动子的平均速度为

$$\bar{\dot{x}}_c(t) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \dot{x}_c(t) dt, \quad (3)$$

在脱离瞬间,动子具有速度  $\dot{x}_c(t_1)$ , 则定、动子脱离期间动子速度为:

$$\dot{x}_f(t) = e^{-\frac{c}{m}(t-t_1)} \left\{ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_l}{c} \right\} - \frac{F_l}{c}. \quad (4)$$

设下次开始接触时刻为  $t'_0$ , 则在脱离期间  $t_1 < t < t'_0$ , 动子平均速度为:

$$\bar{\dot{x}}_f(t) = \frac{1}{t'_0 - t_1} \int_{t_1}^{t'_0} \dot{x}_f(t) dt = \frac{1 - e^{-\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)}}{t'_0 - t_1} \frac{m}{c} \left[ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_l}{c} \right] - \frac{F_l}{c} \approx \left[ 1 - \frac{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)}{2!} \left[ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_l}{c} \right] - \frac{F_l}{c} \right]. \quad (5)$$

假设动子在下一次接触前速度  $\dot{x}(t'_0)$  衰减到 0, 且脱离期间动子恰好无反向运动的负载力作为电机的最大负载力, 则:

$$F_{l,max} = \frac{c}{e^{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)} - 1} \dot{x}_c(t_1). \quad (6)$$

式(5)和(6)式表明: 脱离时刻动子速度和脱离时间长短是影响直线超声电机的稳定运动速度和负载能力的重要原因。采用多个直线超声电机定子异步并联工作方式可以缩短定、动子脱离时间, 并有望提高动子速度  $\bar{\dot{x}}_f(t)$  和最大负载能力  $F_{l,max}$ 。

### 4 异步并联性能分析

#### 4.1 2 个直线超声电机异步并联

假设图 3 中 2 个驱动头与图示 2 中的驱动头具有相同的动力学特性, 它们的椭圆运动在时间上相差  $\pi$ , 则这 2 个驱动头呈现出交替与动子接触的工作方式。

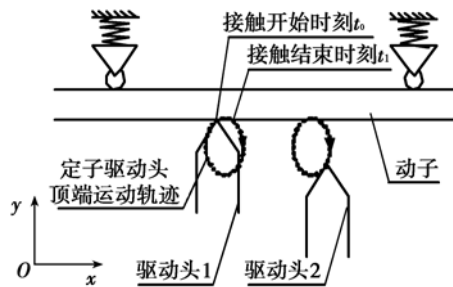


图 3 2 个电机异步并联时驱动头运动示意图  
Fig. 3 Movement of driving tips for ABLUSM with 2 stators

相邻 2 次接触间的脱离时间可以表示为:

$$\Delta t = \frac{1}{2} [(t'_0 - t_1) - (t_1 - t_0)] < \frac{1}{2} (t'_0 - t_1). \quad (7)$$

在脱离期间, 动子平均速度为:

$$\bar{\dot{x}}_{f,2}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} \dot{x}_f(t) dt \approx \left[ 1 - \frac{\frac{c}{m}\Delta t}{2!} \right] \left[ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_l}{c} \right] - \frac{F_l}{c} >$$

$$\left[ 1 - \frac{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)}{2!} \right] \left[ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_l}{c} \right] - \frac{F_l}{c}. \quad (8)$$

与单一驱动头情况式(5)相比, 脱离期间动子平均速度增加了:

$$\Delta \bar{\dot{x}}_f(t) = \bar{\dot{x}}_{f,2}(t) - \bar{\dot{x}}_f(t) > \frac{1}{2} \frac{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)}{2!} \left[ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_l}{c} \right], \quad (9)$$

最大负载力为:

$$F_{l,max,2} = \frac{c}{e^{\frac{c}{2m}\Delta t} - 1} \dot{x}_c(t_1) > \frac{c}{e^{\frac{c}{2m}(t'_0 - t_1)} - 1} \dot{x}_c(t_1). \quad (10)$$

若定义最大负载力放大系数为:

$$\beta = \frac{F_{l,max,2}}{F_{l,max}}, \quad (11)$$

则

$$\beta = \frac{e^{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)} - 1}{e^{\frac{c}{2m}\Delta t} - 1} > \frac{e^{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1)}}{e^{\frac{c}{2m}(t'_0 - t_1)} - 1} = \frac{\frac{c}{m}(t'_0 - t_1) + \frac{\left[ \frac{c}{m}(t'_0 - t_1) \right]^2}{2!} + \dots}{\frac{c}{2m}(t'_0 - t_1) + \frac{\left[ \frac{c}{2m}(t'_0 - t_1) \right]^2}{2!} + \dots} > 2. \quad (12)$$

式(9)和(12)表明: 两个驱动头情况的平均速度大于单驱动头的情况; 其负载能力大于两个单驱动头情况的代数和。即采用异步并联方式可以同时提高间歇接触直线型超声电机的输出速度和输出力。由于电机的输出功率与输出力和速度的乘积成正比, 若把所有异步并联的直线超声电机看作一个直线超声电机, 可以认为其输入功率为原来的 2 倍, 而输出功率大于原来输出功率的 2 倍, 则效率应该比以前有所提高。

#### 4.2 3 个直线超声电机异步并联

$n$  为 3 时, 如图 4 所示, 与  $n$  为 2 时情况类似, 相邻 2 次接触间的定、动子脱离时间为:

$$\Delta t = \frac{1}{3} (t'_0 - t_1) - \frac{2}{3} (t_1 - t_0) < \frac{1}{3} (t'_0 - t_1). \quad (13)$$

与单个定子时的式(5)相比, 脱离期间动子平

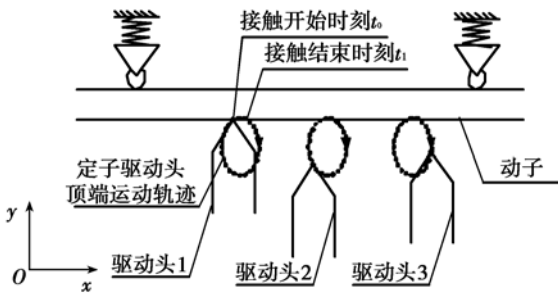


图 4 3 个电机异步并联时驱动头运动示意图

Fig. 4 Movement of driving tips for ABLUSM with 3 stators

均速度增加了:

$$\Delta \dot{x}_f(t) > \frac{1}{3} \frac{c}{m} \frac{(t'_0 - t_1)}{2!} \left[ \dot{x}_c(t_1) + \frac{F_1}{c} \right]. \quad (14)$$

最大负载力放大系数为:

$$\beta = \frac{F_{1,max,3}}{F_{1,max}} > 3. \quad (15)$$

式(14)和(15)表明:3 个直线超声电机异步并联时的平均速度大于单个直线超声电机驱动时的情况;其负载能力大于单个直线超声电机最大负载力的 3 倍。

### 4.3 直线超声电机异步并联效果

由上文理论分析结果可以估计, n 个直线超声电机异步并联时,其输出功率可以成倍提高,而系统的效率也会提高,且避免了多个超声电机定子同步并联工作时相互干扰、耦合以至于效率降低的问题。

假设多个电机并联驱动与单个电机驱动时定子与动子之间的摩擦性能一致,定子与动子之间施加的预压力也相同,则随着 n 的增大,电机的断电自锁力(矩)成倍增加;相同的速度和负载情况下,异步并联电机关断时间将大幅变小。同样,在启动的过程中,在同样的时间段内,异步并联电机完成了较多的驱动过程,其输出总功率是单个电机的 n 倍,所以其启动也应比单个电机快很多。

在同步并联方式中,同一组驱动(激励)信号可供 n 个电机共用,在这一点上,异步并联时的驱动信号就显得较为复杂,但随着基于单片机、DSP 及专用集成控制芯片的发展,驱动器也不会成为阻碍其应用的制约因素。

直线超声电机异步并联之后,如果任一个定子不能正常工作,都会影响整个系统正常工作,从

而影响系统可靠性,但这可以通过设计特殊的机构配合传感器和控制系统来解决这个问题。

以上分析表明,并联较少电机时,异步并联直线超声电机相对于单个直线超声电机优势明显,可以满足精密定位平台、光学精密工程、微电子等大多数领域的应用需求。特别适合于小型低成本直线超声电机,可以降低单个直线超声电机定子加工制造方面的难度,在推动直线超声电机的产业化应用方面具有重要意义。

## 5 单驱动头直线超声电机实验

### 5.1 机械特性

实验采用文献[3]中的单驱动头 V 型定子进行,如图 5、图 6 所示。

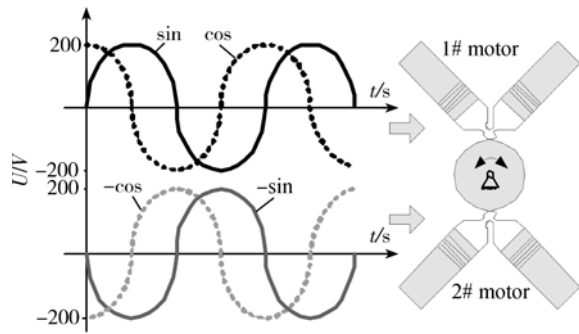


图 5 驱动信号和电机布置

Fig. 5 Driving signals and arrange of LUSM

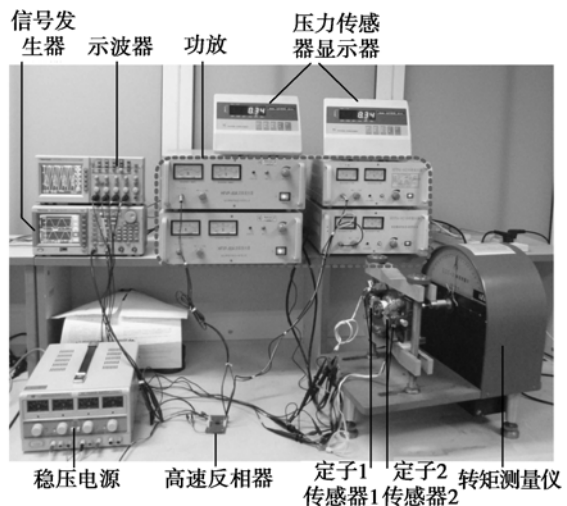


图 6 异步并联实验系统

Fig. 6 Thrust-speed experimental system of ABLUSM

将两个这样的定子对称安装在氧化铝陶瓷转子两侧,两个定子驱动转子顺时针(逆时针)方向转动。两个定子所需要的  $\sin$  和  $\cos$  (1# 定子)及  $-\sin$ 和  $-\cos$  (2# 定子)4 路信号由信号发生器及高速反相器产生,由功率放大器放大。每个定子与转子之间的预压力通过压力传感器设定为 80 N。

在两个定子的工作频率范围内选择 33.2 kHz 作为两个定子的工作频率,类似于文献[11]中的单一频率激振模式。定子上的驱动电压峰峰值为 400 V。

为了便于比较,在相同的预压力、电压及频率的情况下分别做了单个定子驱动、两个定子同步驱动及两个定子异步并联的实验,用 CZC-2 型转矩测量仪测试得到输出力矩 ( $N \cdot m$ ) 和速度 ( $r/min$ ),再根据滚轮上的陶瓷环的直径 (45 mm) 将得到的数据分别乘以系数 42.553 和 2.460 得到推力 ( $N$ ) 和速度 ( $mm/s$ ),4 条推力与速度的曲线如图 7 所示。由图可知,两个定子异步并联时,其最大负载力分别比单个定子和两个定子同步并联时提高了 180% 和 40%;最大空载速度比 1 号定子单独驱动时提高了 15.76%,比 2 号定子单独驱动时提高了 12.8%,比 1 号、2 号定子同步并联时提高了 17.66%。

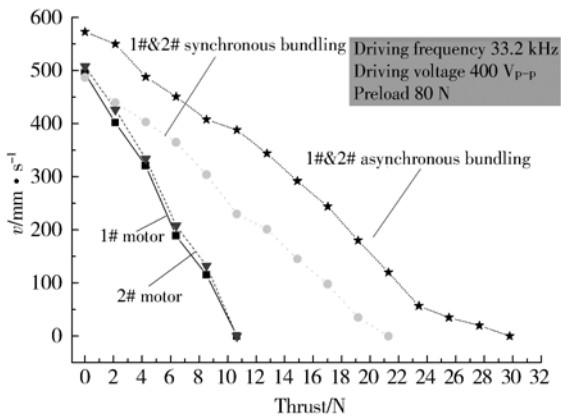


图 7 推力-速度实验结果对比

Fig. 7 Thrust-speed characteristics of different LUSMs

由输入电压峰峰值可得到输入电压有效值,与输入电流乘积得输入功率,由输出推力与直线速度可得输出功率,进而可得电机的效率,两个电机单独驱动及采用同步并联和异步并联时的效率曲线如图 8 所示。由图可知,同步并联时的最大效率比单个电机驱动时低,说明同步并联时存在

着互相牵制,内耗增加的情况。异步并联时的最大效率比同步并联驱动时提高了约 50%。

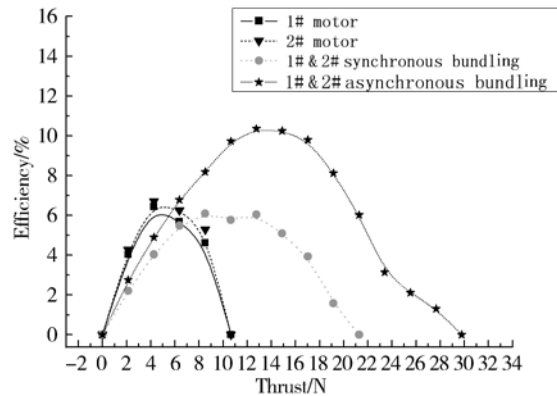


图 8 异步并联效率对比

Fig. 8 Efficiency of different LUSMs

### 5.2 瞬态响应特性

用基于 NI PXI-1031、NI PXI-2705 的超声电机瞬态特性测试系统测试两个直线超声电机定子及其同步并联、异步并联时的启动、关断特性。编码器为瑞普 5 000 线编码器。由于功放体积太大,所以改用两个 UMD-1 型驱动器共用一个 CD4046 中的压控振荡器的信号,电感为 2.7 mH;预压力由预紧力螺栓调节,经过标定的弹簧的压缩量设定为 80 N,驱动频率仍为 33.2 kHz。实验系统及实验得到的曲线如图 9、图 10 所示,启动、关断时间如表 1 所示。

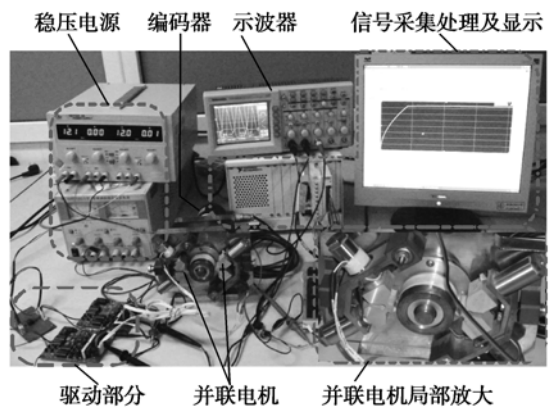


图 9 瞬态特性测试实验系统图

Fig. 9 Experimental system for transient characteristics

由图 10 和表 1 可知,同样条件下,两个定子并联的时候,启动和关断都要比单个定子驱动时快约一倍,其中,两台直线超声电机定子异步并联

时效果最好,启动、关断时间最短。

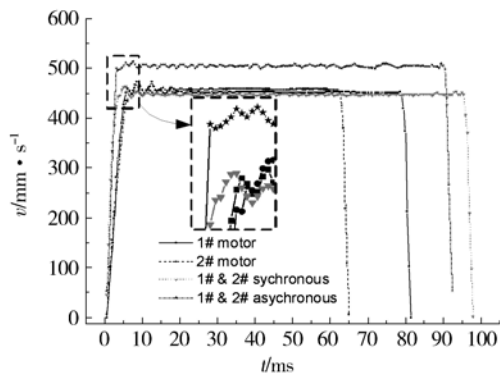


图 10 不同的直线超声电机瞬态特性对比

Fig. 10 Transient characteristics of different LUSMs

表 1 直线超声电机及其不同并联方式的瞬态特性比较

Tab.1 Comparison of transient characteristics between different LUSMs

Number	Start/ms	Stop/ms
1# motor	5.6	4.0
2# motor	5.3	3.8
1# & 2# synchronous	3.0	2.2
1# & 2# asynchronous	2.7	2.1

## 6 双驱动头直线超声电机实验

为了对直线超声电机的异步并联性能做更进一步的了解,本文又选了两个频带有重叠的文献[5]的电机驱动单自由度平台进行了实验。为了更好地控制电机驱动信号之间的相位以及信号幅值,同时为了产生使超声电机步进运动的一个或多个周期信号,选择了信号发生器加功率放大器的实验实施方案。信号发生器型号为泰克 AFG3022、AFG3022B 及 Agilent33120A,其中 Agilent33120A 产生同步信号分别给另两个信号发生器同步使用,再加上 4 个功率放大器从而产生 4 路任意频率、相位以及幅值的信号(在功率放大器的最高电压范围内),用 4 通道示波器 TDS2014 实时查看加在定子上的信号参数。最大负载力测试采用吊砝码的方式,步进特性测试采用 RENISHAFW 的 XL-80 系列激光干涉仪,在经过地基隔振处理的洁净室进行实验。

### 6.1 最大负载力测试

在两个超声电机的频带重叠范围内选择 50.6 kHz 为测试频率,工作电压为 300 V<sub>pp</sub>,用压力传感器设定单个超声电机定子的预压力为 50 N,测试两个电机并联时的设定为 100 N,用 1 转 2 的连接件转接,同时给两个超声电机定子施加预压力,并保证两个定子的预压力基本相等,系统如图 11。

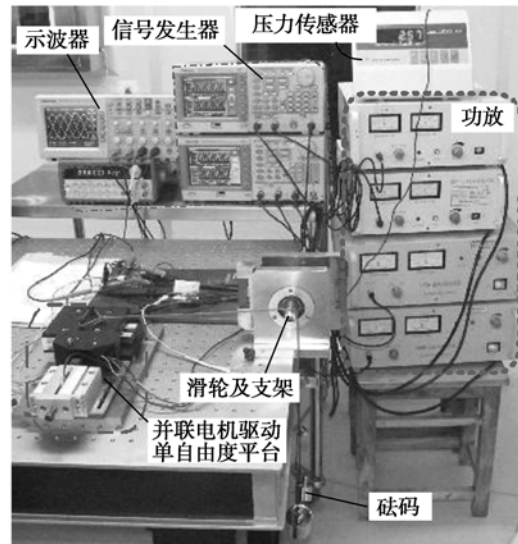


图 11 推力测试

Fig. 11 Thrust measurement of LUSM with two driving tips

表 2 直线超声电机及其不同并联方式的负载力比较

Tab.2 Maximum thrust of different LUSMs

Number	4# motor	5# motor	4# & 5# synchronous	4# & 5# asynchronous
	F <sub>L,max</sub> /N	8.1	8.9	16.1

实验结果见表 2,异步并联时最大推力为 21.2 N,是同步并联的 1.3 倍,比两个电机单独驱动推力之和提高 25%。

### 6.2 最小分辨率测试

用信号发生器产生一个或者几个周期的信号驱动电机步进运动,用激光干涉仪测出微小步距,通过改变频率和信号周期个数可以调节驱动信号加在定子上的时间,保证电机能够驱动平台运动。另外需要设置驱动信号之间的停顿间隔,本次实验设定为 100 ms,以使平台震荡充分衰减。通过以上设置使平台能产生一个接一个的稳定的微小

位移,实现电机最小位移分辨率的测定。实验系统如图 12,实验结果如图 13~图 16。

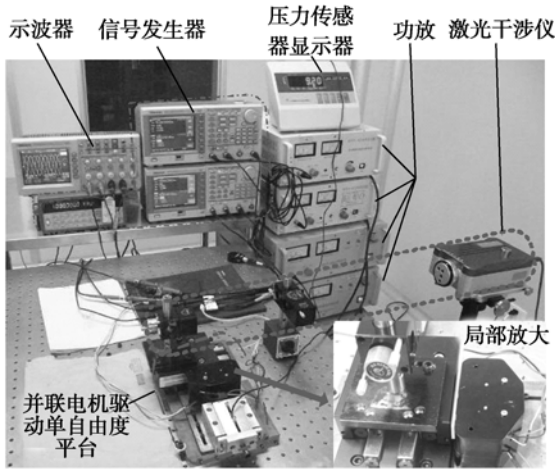


图 12 双驱动头直线超声电机实验系统

Fig. 12 Experimental system of LUSM with two driving tips

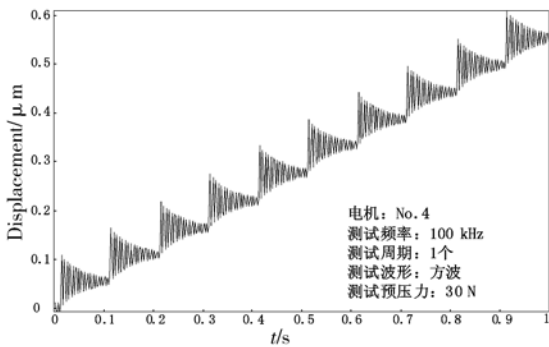


图 13 4# 超声电机最小分辨率

Fig. 13 Minimum resolution of 4# LUSM

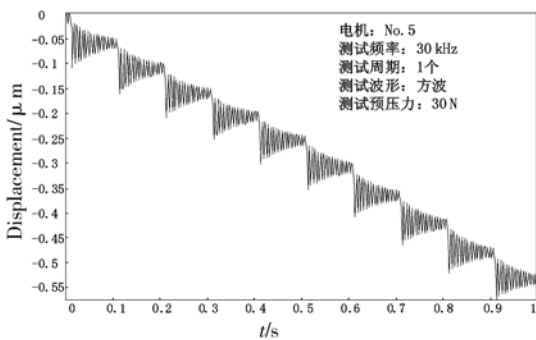


图 14 5# 超声电机最小分辨率

Fig. 14 Minimum resolution of 5# LUSM

图中曲线显示了电机每一步步距,取其连续

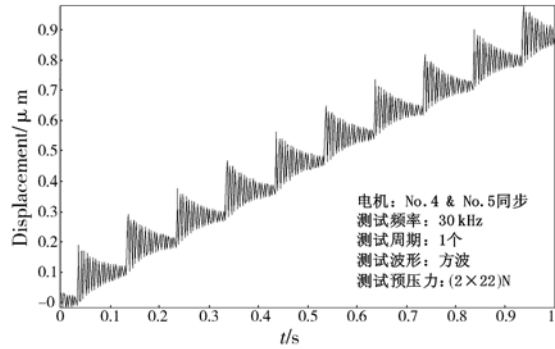


图 15 4#和5#超声电机同步并联最小分辨率

Fig. 15 Minimum resolution of 4# & 5# SB LUSM

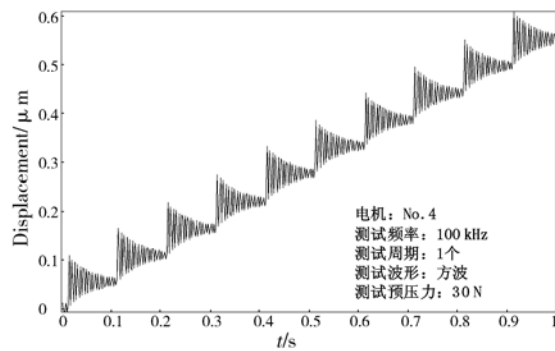


图 16 4#和5#超声电机异步并联最小分辨率

Fig. 16 Minimum resolution of 4# & 5# AB LUSM

10步求平均值即得到相应电机的最小分辨率:4#和5#电机的最小分辨率平均为51.9nm;同步并联时为84.7nm;而异步并联时最小分辨率为32.6nm,较单个电机减小37.2%,较同步并联时较小61.5%。

由此可以认为,与单个直线超声电机相比较,通过异步并联可以提高直线超声电机驱动的精密定位平台的位移分辨率。但通过实验也发现4#和5#仍存在着动态响应上的差异,4#可以响应的脉冲信号更窄,而同步并联时的最小分辨率较差可能就与两者响应不一致有关。另外,从曲线图可以看到,平台实际上每走一步都有一个震荡过程,所以在实际应用中,若想获得较高的定位精度,需要设置较大的间歇时间。

### 7 结 论

针对目前用于精密定位平台的直线型超声电

机推力小、位移分辨率低、可靠性不高的问题,本文提出了直线超声电机异步并联的概念,进行了理论分析和相关实验。两种电机的实验均表明,直线超声电机异步并联可以大幅提高推力,结果比两个电机同步并联提高 30% 以上,比两个电机单独驱动时推力之和提高 25% 以上。最小分辨率测试实验表明,异步并联时最小位移分辨率达到 32.6 nm,是单个电机的 62.8%,是同步并联的 38.5%。

单驱动头电机的实验还表明:同步并联时的

空载速度比单个定子略低,而异步并联时的空载速度可以提高 10% 以上;异步并联时瞬态响应时间比同步并联时更短,约为单个定子驱动时响应时间的 50%。两定子异步并联可以避免同步并联时的相互干扰,效率可提高约 50%。

直线超声电机异步并联可以大幅提高推力和空载速度,缩短瞬态响应时间,提高位移分辨率。该项研究是对直线超声电机在精密定位领域应用的有益探索,对直线超声电机的产业化具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] ZHAO CH SH. *Ultrasonic Motors Technologies and Applications* [M]. Beijing: Science Press, Berlin Heidelberg; Springer-Verlag, 2010.
- [2] KUROSAWA M K, KODAIRA O, TSUCHITOI Y, et al.. Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor using two sand wich-type vibrators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, 45(5): 1188-1195.
- [3] 时运来, 李玉宝, 赵淳生. V 型大推力直线超声电机的运动机理分析[J]. *压电与声光*, 2008, 30(6): 772-775.  
SHI Y L, LI Y B, ZHAO CH SH. Operating principle analysis of a V-shape linear ultrasonic motor[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2008, 30(6): 772-775(in Chinese).
- [4] KAZUMASA A, RYOUICHI F, TAKESHI F, et al.. High speed, high resolution ultrasonic linear motor using V-shape two bolt-clamped Langevin-type transducers[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2009, 30(3): 180-186.
- [5] LI Y B, SHI Y L, ZHAO CH SH. Design and experiment of butterfly linear ultrasonic motor with two driving tips[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2327-2333.
- [6] 金家楣. 新结构、新原理超声电机及其应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
JIN J M. *Research on novel ultrasonic morors theory and applications* [D]. Nanjing: NUAA, 2007. (in Chinese)
- [7] YANG M, ROBERT C R, MARTIN C L, et al.. Performance improvement of rectangular-plate linear ultrasonic motors using dual-frequency drive[C]. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Montreal, Canada, 2004: 1600-1606.
- [8] JIN J M, ZHAO CH SH. Linear ultrasonic motor using quadrature plate transducer[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2009, 4(1): 88-91.
- [9] WAIAI T, KUROSAWA M K, HIGUCHI T. Transducer for an ultrasonic linear motor with flexible driving part[J]. *IEEE Ultrasonic Symposium*, 1998(1): 683-686.
- [10] 李亭, 张铁民, 刘潇建. 超声电机多定子同步驱动技术的研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2008, 28(4): 343-346.  
LI T, ZHANG T M, LIU X J. Synchronized driving of multi-stator ultrasonic motor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2008, 28(4): 343-346. (in Chinese)
- [11] HEMSEL T, WALLASCHEK J. A novel approach for high power ultrasonics motors [C]. *Proceedings of IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Conference*, 2004: 1161-1164.
- [12] MRACEK M, HEMSEL T. Synergetic driving concepts for bundled miniature ultrasonic linear motors[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: 597-602.
- [13] MRACEK M, HEMSEL T, SATTEL T, et al.. Driving concepts for bundled ultrasonic linear motors[J]. *J Electroceram*, 2008(20): 153-158.

## 作者简介:



王金鹏(1979-),男,河南商丘人,博士研究生,2002年于河南理工大学获学士学位,2006年于东南大学获硕士学位,主要从事超声电机及其驱动和控制的研究。E-mail:mejpw@yahoo.cn;



金家楣(1965-),男,浙江绍兴人,副研究员,2008年于南京航空航天大学获博士学位,主要从事超声电机技术的研究。E-mail:jjm3452001@yahoo.com.cn

## 导师简介:



赵淳生(1938-),男,湖南衡山人,教授,中国科学院院士,博士生导师,1961年毕业于南京航空学院飞机系,1984年毕业于法国巴黎高等机械学院获得博士学位,长期从事振动工程技术和应用的研究。E-mail:cszhao@nuaa.edu.cn

## ● 下期预告

## 应力传感光缆的应力传递特性分析

张旭苹\*,高 岑,王 峰,李存磊

(南京大学 光通信工程研究中心,江苏 南京 210093)

在光纤应力传感系统中,通常采用传感光缆来代替裸光纤作为敏感元件,传感光缆必须具有良好的应力传递性能,才能保证系统的精度和灵敏度。在使用传感光缆的应力传感系统中,检测到的应变是光纤的应变,它并不能直接反映光缆实际受到的应力。本文从弹性力学的角度,利用拉梅公式和广义胡克定律相结合的方法,为两种典型的传感光缆:紧缚型传感光缆和加强型传感光缆建立了应力传递的理论模型,推导出光缆的应变与它受到的应力之间的关系。同时,本文分别对紧缚型和加强型传感光缆的样品进行了应力实验,利用 BOTDR 技术测量光缆的应变。理论计算和实验结果线性度均超过了 97%,两者趋势一致,斜率之间的差别小于 8%,证明了理论模型的有效性。